

МЕЛИОРАЦИЯ, РЕКУЛЬТИВАЦИЯ И ОХРАНА ЗЕМЕЛЬ

Научная статья

УДК 627.8.06, 626.87, 627.8.07

doi: 10.31774/2222-1816-2021-11-2-92-110

Численное моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния основания плотины сезонного регулирования

Ольга Георгиевна Дегтярева¹, Сергей Михайлович Васильев²

¹Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина, Краснодар, Российская Федерация, mail@kubsau.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

²Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск, Российская Федерация, rosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4039-8976>

Аннотация. Цель: изучение влияния напора в верхнем бьефе и подпора со стороны нижнего бьефа на плотину сезонного регулирования, устраиваемую в горной местности. **Материалы и методы:** сложные геологические условия привязки в горной местности ответственного в плане безопасности сооружения подвигли нас на более детальное исследование вопроса его напряженно-деформированного состояния с возможностью детализированно предложить проектировщикам пределы возможных изменений параметров перемещений основания плотины сезонного регулирования. Необходимость устройства плотин именно в горной местности обусловлена несколькими факторами. Прежде всего, это принципиальная необходимость аккумулировать воду на Черноморском побережье Северного Кавказа, где наблюдается ее все возрастающий дефицит как для нужд сельскохозяйственных производителей, так и для водоснабжения населения, тогда как в осенне-зимний период осадков в регионе выпадает даже с избытком, о чем свидетельствуют противоположные затраты. Во-вторых, рельеф гор и их ущелья – природой созданные объемы для аккумуляции воды. В-третьих, земли горных ущелий – это наиболее не приспособленные для сельскохозяйственного использования земли, в отличие от земель долин, где в настоящее время располагают водохранилища. **Результаты:** исследование влияния напора в верхнем бьефе и подпора со стороны нижнего бьефа на плотину осуществлено с использованием численного моделирования при применении программных продуктов Midas и Maxima, позволивших охватить весь комплекс действий, необходимый при решении подобных задач. **Выводы:** установлено, что в диапазоне изменения подпора в верхнем бьефе плотины от 0,6 и до 2,8 м перемещения в основании плотины имеют экстремальные значения при постоянных значениях напора на плотине 1,0; 5,0 и 10,0 м. В целом наибольшие значения перемещений в основании плотины наблюдаются при наибольшем напоре плотины со стороны верхнего бьефа, равном 10,0 м.

Ключевые слова: водоснабжение, водохранилище, основание плотины, пресная вода, перемещение грунта, гидротехнические сооружения

LAND RECLAMATION, RECULTIVATION AND LAND PROTECTION

Original article

Computer modeling and stress-strain analyses of the seasonal storage dam foundation

Olga G. Degtyareva¹, Sergey M. Vasilyev²

¹Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation, mail@kubsau.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9312-9222>

²Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk, Russian Federation, rosniipm@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4039-8976>

Abstract. Purpose: to study the influence of the water head in the upstream and the backwater on the part of the downstream on the seasonal storage dam, built in a mountainous area. **Materials and methods:** complex geological conditions of anchoring a responsible in terms of safety structure in a mountainous area prompted us to a more detailed study of the issue of its stress-strain state with the ability to offer designers in detail the limits of possible changes in the parameters of the displacement of the seasonal storage dam foundation. The need for the dam construction in the mountainous area is due to several factors. First of all, it is a fundamental need to accumulate water on the Black Sea coast of the North Caucasus, where there is an ever-increasing deficit both for the needs of agricultural producers and for public water supply, while in the autumn-winter period, precipitation falls in the region even in abundance, as it is evidenced by flood control costs. Secondly, the mountainous relief and their gorges is the nature-created volume for water accumulation. Thirdly, the lands of mountain gorges are the most unsuitable for agricultural use lands, in contrast to the lands of the valleys, where reservoirs are currently located. **Results:** the study of the influence of the water head in the upstream and the backwater from the downstream on the dam was carried out using numerical modeling using the Midas and Maxima software products, which made it possible to cover the entire range of actions necessary for solving such problems. **Conclusions:** it was found that in the range of backwater changes in the headwater of the dam from 0.6 to 2.8 m, displacements at the dam foundation have extreme values at constant values of the head at the dam of 1.0; 5.0 and 10.0 m. In general, the largest displacement values at the dam foundation are observed at the highest head of the dam in the upstream, equal to 10.0 m.

Keywords: water supply, reservoir, dam foundation, fresh water, ground movement, hydraulic structures

Введение. На Черноморском побережье Краснодарского края и в Республике Крым ощущается дефицит пресной воды. С ростом благосостояния народонаселения данные регионы приобретают все большую популярность, особенно это касается летнего периода. В свою очередь именно в летний период, когда отмечается наибольший приток отдыхающих, которых надо кормить, поить и которым нужно создавать комфортные условия проживания, обозначаются довольно устойчивые и серьезные проблемы с пресной водой. Воды не хватает часто на нормальное питьевое водоснабжение, а отдыхающих надо насытить южными фруктами и овощами, выращенными под южным солнцем, для этого также нужна вода. Урожайность фруктов и овощей при орошении в данных регионах возрастает в несколько раз, при этом эта продукция однозначно более качественная, чем богарная [1].

В то же время в регионах, о которых идет речь, по году в целом осадков выпадает довольно значительное количество, в среднем от 900 до 1500 мм/год. Значительные материальные и трудовые ресурсы ежегодно тратятся на противопаводковые мероприятия [2]. Однозначно стоит вопрос об аккумуляции воды, обильно выпадающей в осенне-зимний период. Однако на сегодня практически все удобные для этого места использованы, дальнейшее развитие этого вопроса по критериям, устоявшимся в практике на сегодня, недопустимо [3–5]. Нельзя затапливать поймы рек, нельзя выводить в массовом количестве плодородные земли.

Решение данного вопроса возможно, если перенести водохранилища в горы, которых здесь предостаточно [6]. Ведь ущелья самой природой созданы как объемы, в которых в том числе можно и нужно накапливать атмосферные осадки. При этом в горах часты осадки и в летний период года, однако они в таком режиме довольно быстро уходят в подземные воды, которыми в горных условиях воспользоваться сложно.

В свою очередь строительство водохранилищ в горной местности – это далеко не простой процесс [7]. По существу, это стало возможно в предполагаемом массовом порядке лишь при современном развитии необходимых строительных материалов, строительной техники и технологий [8].

Технические возможности строительной индустрии, в свою очередь, должны были подкрепляться проектными возможностями [9–11]. Эту задачу позволили решить цифровые технологии, а именно численное моделирование [12]. Используя именно его, мы предприняли попытку рассмотреть, исследовать и проанализировать один из насущных вопросов, стоящих перед проектировщиками при проектировании плотин в горной местности, а именно – оценить напряженно-деформированное состояние в основании плотины в зависимости от уровней воды в верхнем и нижнем бьефах.

Материалы и методы. Моделирование напряженно-деформированного состояния в основании плотины с определением величин вертикаль-

ных перемещений основания реализовано в специализированном геотехническом программном комплексе, предназначенном для моделирования взаимодействий сооружения и основания, на основе метода конечных элементов GTS NX [13].

В свою очередь моделирование основания базируется на модели Мора – Кулона, в которой допускается некоторая идеализация работы грунта в том аспекте, что принимаемые деформации постоянны на всем протяжении упругой работы грунта, вплоть до зоны пластических деформаций, т. е. его разрушения [14, 15].

На сегодня разработано и успешно применяется значительное количество модифицированных зависимостей Мора – Кулона, где основные попытки направлены на учет нелинейности работы грунта при изменении эффективных нормальных напряжений [16, 17].

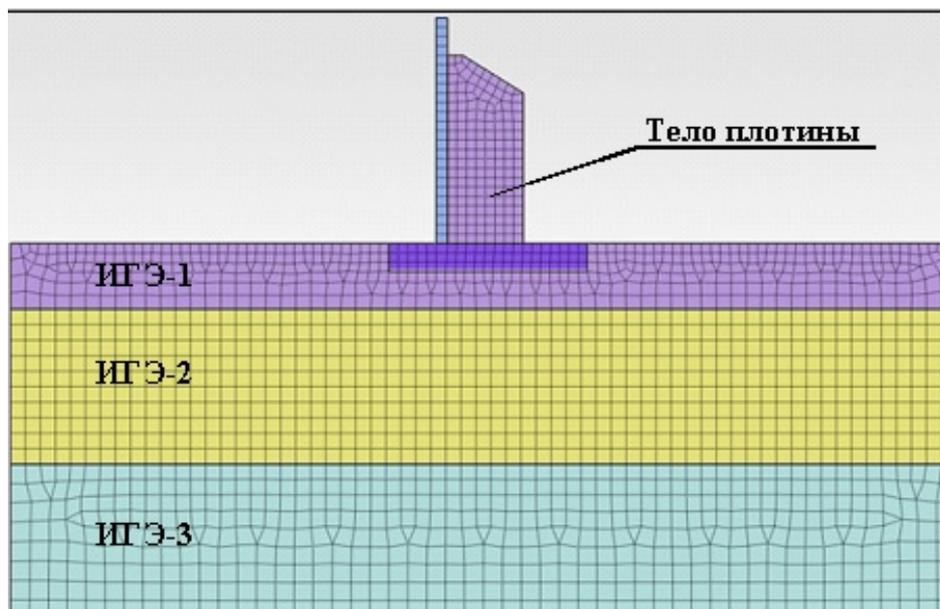
Ввиду сложности выбранного для анализа вопроса, а также большого объема информации, подлежащей оценке, в данной работе ограничимся исследованием лишь перемещений основания TU (м).

В процессе исследования осуществлен численный эксперимент, где в качестве аргументов приняты уровни воды в верхнем и нижнем бьефах, а за исследуемую функцию приняли перемещения в основании плотины TU (м).

Расчетная модель с инженерно-геологическими элементами (ИГЭ) и плотиной на них представлена на рисунке 1.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния основания плотины в зависимости от изменения уровня воды в верхнем бьефе во всем диапазоне исследований при постоянном уровне воды в нижнем бьефе, равном 0,8 м, представлены в таблице 1.

На рисунке 2 представлен визуализированный вид расчета перемещения основания плотины TU (м) при уровне воды в верхнем бьефе 4,0 м и в нижнем бьефе 0,8 м.



ИГЭ-1 – аллювиальные грунты (модуль деформации 11,6 МПа, удельное сцепление 0,020 МПа, угол внутреннего трения 20,63°); ИГЭ-2 – элювий коренных скальных грунтов: мергель выветрелый до щебня и дресвы (сапролит) с прослоями серой глины, с сохранением материнской структуры (модуль деформации 65,3 МПа, удельное сцепление 1,7 МПа, угол внутреннего трения 62,36°); ИГЭ-3 – флишевое переслаивание трещиноватых мергелей серых, аргиллитов темно-серых, реже песчаников (физико-механические свойства детально не изучались, так как он находится вне сферы взаимодействия проектируемого сооружения)

Рисунок 1 – Расчетная модель с геологическими элементами и плотиной

Таблица 1 – Напряженно-деформированное состояние плотины при уровне воды в нижнем бьефе, равном 0,8 м

Номер опыта	Уровень воды, м		Перемещение основания TU , м	Полные напряжения	
	верхний бьеф	нижний бьеф		TOTAL $S - YU$, кН/м ²	TOTAL $S - XU$, кН/м ²
1	1	0,8	-0,033	-85,28	-33,95
2	2	0,8	-0,036	-88,65	-35,44
3	3	0,8	-0,039	-92,04	-36,93
4	4	0,8	-0,041	-95,42	-38,44
5	5	0,8	-0,043	-98,79	-39,94
6	6	0,8	-0,046	-102,13	-41,39
7	7	0,8	-0,049	-105,46	-42,84
8	8	0,8	-0,051	-108,77	-44,27
9	9	0,8	-0,053	-112,10	-45,68

В таблице 2 представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния основания плотины в зависимости от изменения уровня воды в верхнем бьефе во всем диапазоне исследований при постоянном уровне воды в нижнем бьефе, равном 2,05 м.

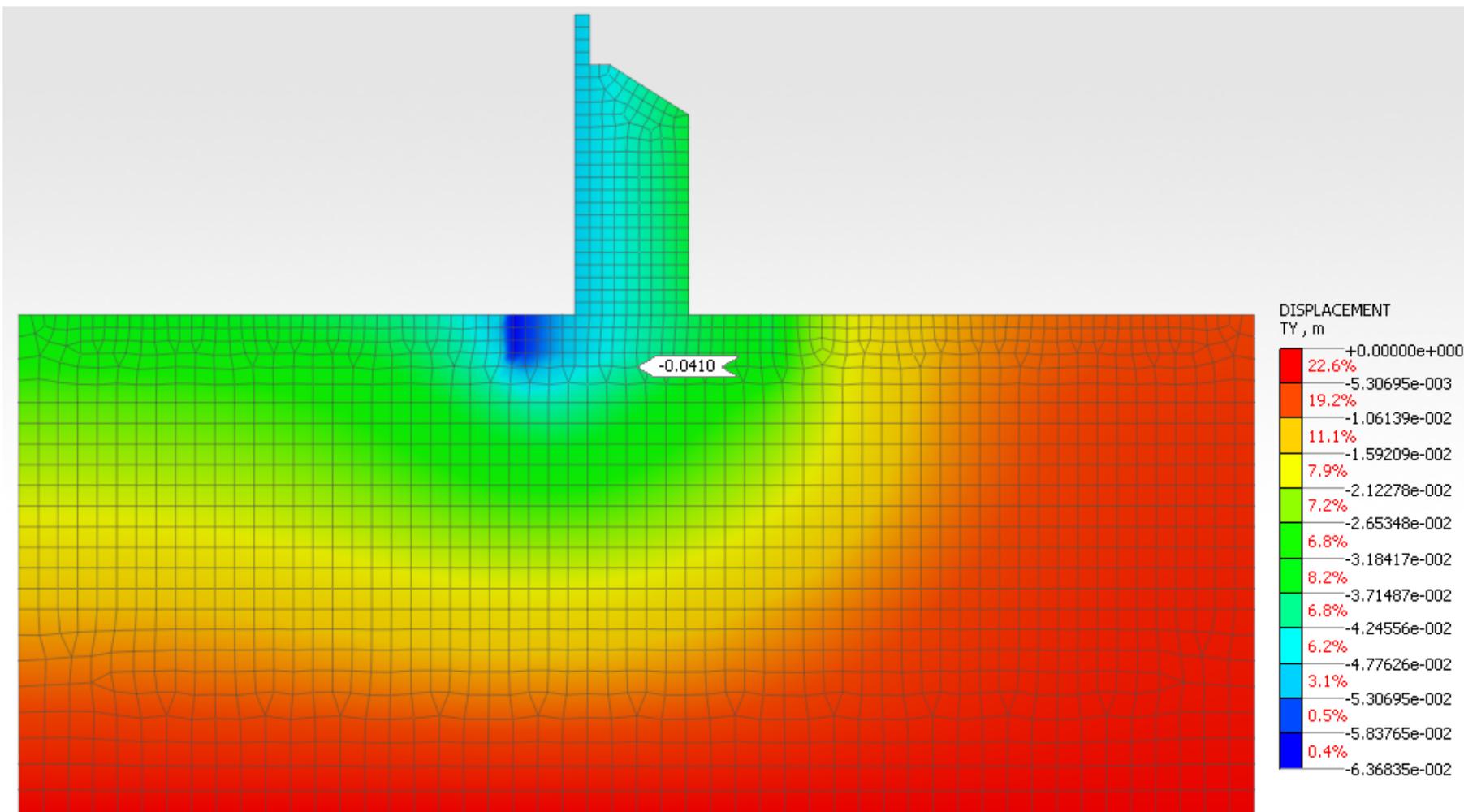


Рисунок 2 – Изополя перемещений при уровне воды в верхнем бьефе 4,0 м, нижнем бьефе 0,8 м

Таблица 2 – Напряженно-деформированное состояние плотины при уровне воды в нижнем бьефе, равном 2,05 м

Номер опыта	Уровень воды, м		Перемещение основания TU , м	Полные напряжения	
	верхний бьеф	нижний бьеф		TOTAL $S - YU$, кН/м ²	TOTAL $S - XX$, кН/м ²
1	1	2,05	-0,037		
2	2	2,05	-0,039	-93,28	-37,42
3	3	2,05	-0,042	-96,64	-38,89
4	4	2,05	-0,044	-99,98	-40,34
5	5	2,05	-0,047	-103,32	-41,79
6	6	2,05	-0,049	-106,64	-43,22
7	7	2,05	-0,052	-109,95	-44,63
8	8	2,05	-0,054	-113,17	-45,98
9	9	2,05	-0,057	-116,30	-47,26

На рисунке 3 представлен визуализированный вид расчета перемещения основания плотины TU (м) при уровне воды в верхнем бьефе 4,0 м и в нижнем бьефе 2,05 м.

Остальные результаты численного моделирования также входят в объем данных, подвергшихся обработке при математическом моделировании процесса исследования напряженно-деформированного состояния плотины в зависимости от изменения уровня воды в верхнем и в нижнем бьефах во всем диапазоне.

Результаты и обсуждение. Анализ результатов имитационного моделирования при исследовании напряженно-деформированного состояния плотины в зависимости от изменения уровня воды в верхнем и нижнем бьефах плотины осуществлен при помощи программного комплекса wxMaxima. В процессе анализа были получены математические модели рассматриваемых процессов, поверхность отклика по функции от принятых к исследованию факторов, графики линий уровней по функции отклика, а также сечения по линиям уровня при постоянном одном из аргументов. Перечисленный набор материалов однозначно позволяет осуществить весь комплекс анализа по программе, представленной выше. Перейдем к последовательному изложению результатов.

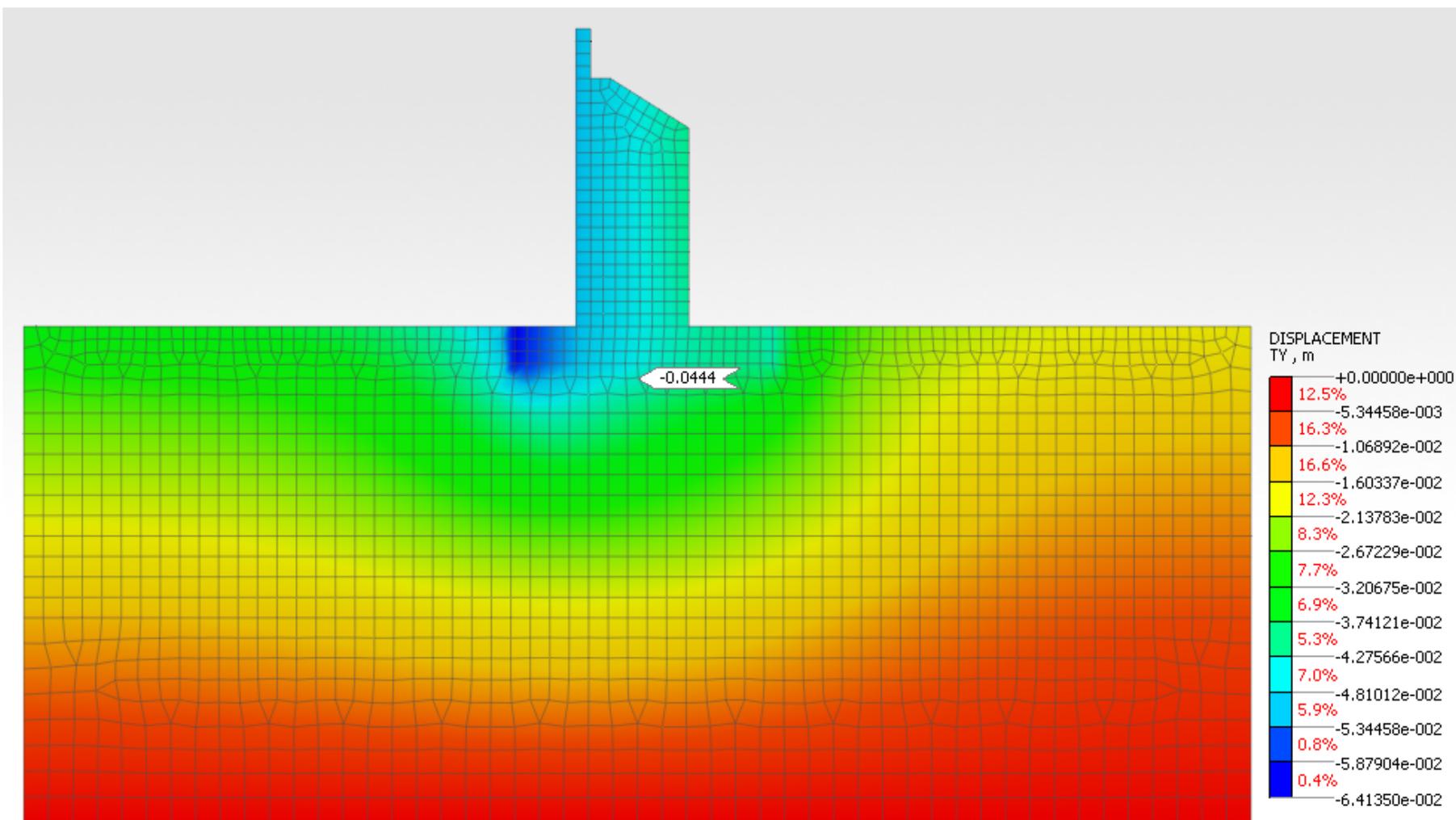


Рисунок 3 – Изополя перемещений при уровне воды в верхнем бьефе 4,0 м, нижнем бьефе 2,05 м

Первоначально экспериментальные данные из таблиц были перенесены в матричный вид посредством следующих действий:

$M : matrix$ ([1.0, 0.8, - 0.033], [2.0, 0.8, - 0.036], [3.0, 0.8, - 0.039],
[4.0, 0.8, - 0.041], [5.0, 0.8, - 0.043], [6.0, 0.8, - 0.046], [7.0, 0.8, - 0.049],
[8.0, 0.8, - 0.051], [9.0, 0.8, - 0.053], [1.0, 1.05, - 0.034], [2.0, 1.05, - 0.037],
[3.0, 1.05, - 0.039], [4.0, 1.05, - 0.041]...).

Используя априорную информацию, выбираем представление обработанных экспериментальных данных в виде полинома второй степени, для чего воспользуемся следующим файлом:

$squares_{estimates}(M, [x, y, z], z = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + f \cdot y^2, [a, b, c, d, e, f])$.

Результатом использования данного файла явились полученные коэффициенты:

$$a = -58864393534331 / 1331269418520000,$$

$$b = -1650978866111 / 1242518123952000,$$

$$c = 9756471499 / 647144856225,$$

$$d = 5538629 / 34514392332,$$

$$e = -125432231599 / 1242518123952000,$$

$$f = -4490537596 / 832043386575.$$

Перевод данных коэффициентов в вид десятичных дробей осуществляется посредством файла *float* (%). Результатом использования данного файла явились полученные следующие коэффициенты:

$$a = -0,14421673983901153,$$

$$b = -0,001328736244796039,$$

$$c = 0,01507617870272905,$$

$$d = 1,604730266354672 \cdot 10^{-4},$$

$$e = -1,009500217188346 \cdot 10^{-4},$$

$$f = -0,225396999325341341.$$

Далее осуществляем проверку полученных коэффициентов в уравнении полинома второй степени. Воспользуемся файлом:

$$lsquares_{residuals}(M, [x, y, z], z = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + f \cdot y^2, first(s)).$$

Результат проверки выборочно представляет вид:

$$0,00391118429025325, 0,002414392178897419, 0,001119500110979256, \\ 0,001026508086498762, 0,001135416125455943, 4,462241678507908 \cdot 10^{-4}, \\ -4,106772631670003 \cdot 10^{-5}, 6,735404229534849 \cdot 10^{-4}, \\ 0,001590048615661345, 0,001598133545882487, \\ 6,122317786778908 \cdot 10^{-5}, \dots$$

В итоге в результате обработки экспериментальных данных имеем нижеследующую математическую модель:

$$Z(x, y) = -0,04421673983901153 - 0,001328736244796039 \cdot x + \\ + 0,01507617870272905 \cdot y + 1,604730266354672 \cdot 10^{-4} \cdot x \cdot y - \\ - 1,009500217188346 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 0,005396999325341341 \cdot y^2.$$

Используя полученную математическую модель и файл *wxplot 3d*, получим поверхность отклика функции при выбранном аргументе X (м) – напор в верхнем бьефе и аргументе Y (м) – напор в нижнем бьефе плотины при нижеследующих диапазонах их изменения: $1,0 \leq x \leq 9,0$, $0,8 \leq y \leq 2,55$.

Поверхность отклика при численном моделировании представляет нижеследующий визуализированный вид, представленный на рисунке 4.

Анализ поверхности отклика при действии напора со стороны верхнего бьефа и подпора со стороны нижнего бьефа на полотно плотины сезонного регулирования при исследовании перемещений в основании позволяет констатировать, что поведение функции может быть охарактеризовано как спокойное, с явно выраженным экстремумом, обеспечиваемым при подпоре плотины со стороны нижнего бьефа, а также линейной зависимостью перемещения основания плотины с увеличением напора в верхнем бьефе.

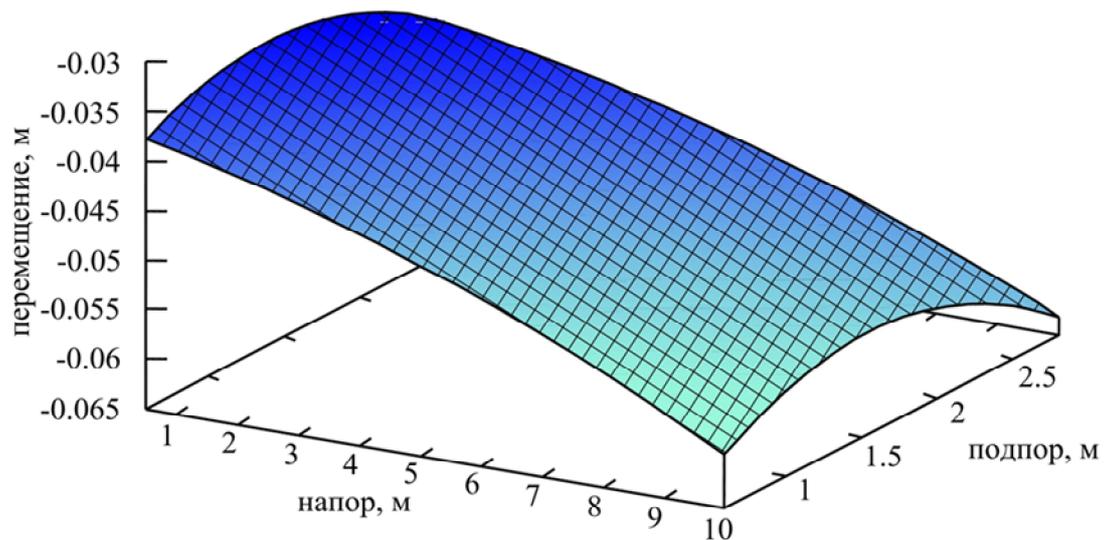


Рисунок 4 – Поверхность отклика напряженно-деформированного состояния основания плотины

В целях дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния основания плотины и перемещений в ее основании необходимо построить линии уровня по представленной поверхности отклика, для чего воспользуемся файлом *contour_{plot}* [18]. Реализация программы файла в тех же изменениях параметров аргументов позволила получить графики линий уровня, представленных на рисунке 5.

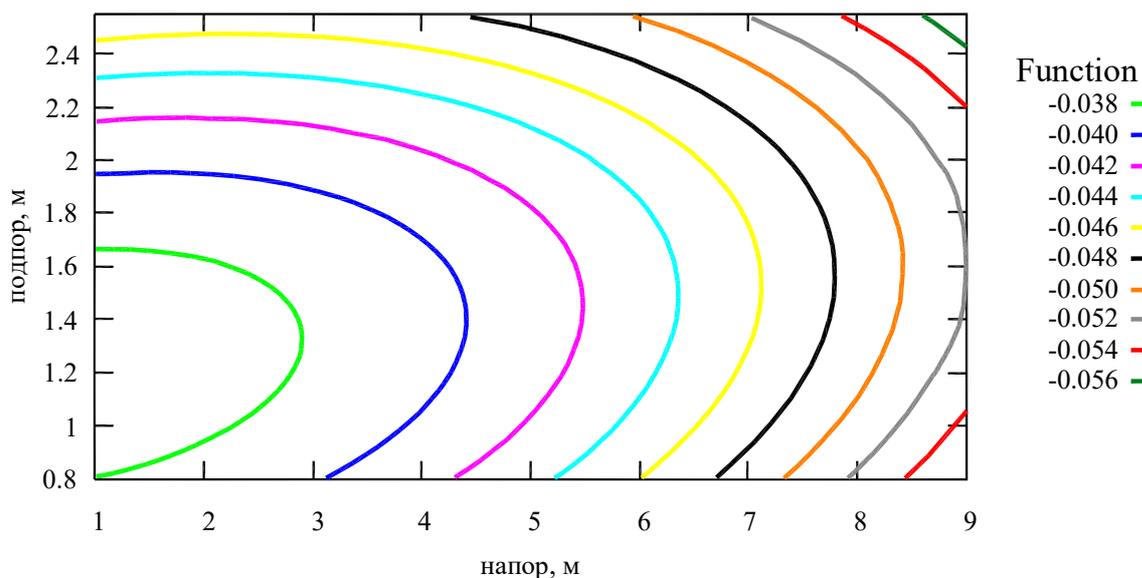


Рисунок 5 – Графики линий уровня по поверхности отклика

Анализ графиков линий уровня по поверхности отклика позволяет констатировать, что функция отклика, т. е. перемещение основания плотины,

происходит от 0,038 до минус 0,056 м. При этом изменение напора в верхнем бьефе плотины отражается на перемещении основания плотины линейно во всем диапазоне изменения аргумента от 1,0 до 9,0 м, и чем больше напор в верхнем бьефе, тем больше перемещение основания плотины.

Изменение подпора со стороны нижнего бьефа на плотину в диапазоне изменения аргумента от 0,8 до 2,55 м обеспечивает однозначно появление экстремума функции отклика.

Более детальное исследование процесса перемещения основания плотины можно провести, если выполнить сечения по линиям уровня функции отклика. Для решения поставленного вопроса необходимо получить промежуточные уравнения из математической модели, задав в ней постоянным какой-либо из аргументов. Допустим, вначале возьмем постоянным аргумент подпора плотины со стороны нижнего бьефа. Зададим нижеследующие значения этих постоянных величин: 0,6; 1,7 и 2,8 м. Выполнив необходимые расчеты, имеем следующие уравнения:

$$F(x, 0,6) = -1,00950 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 0,001232 \cdot x - 0,03711,$$

$$F(x, 1,7) = -1,00950 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 0,0010559 \cdot x - 0,03418456,$$

$$F(x, 2,8) = -1,00950 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 8,7941177 \cdot 10^{-4} \cdot x - 0,0443159.$$

Воспользовавшись файлом *plot 2d*, реализуем его в нижеследующих границах:

$$\text{plot } 2d([F(x, 0,6), F(x, 1,7), F(x, 2,8), [0,5 \leq x \leq 10], [-0,07 \leq y \leq -0,02]]).$$

Результатом данных расчетов будут сечения при выбранных постоянных значениях аргументов, что визуализировано нашло отражение на рисунке 6.

Анализ представленных графиков позволяет констатировать, что во всем диапазоне изменения напора в верхнем бьефе плотины от 1,0 до 9,0 м перемещения в основании плотины непременно увеличиваются. Наибольшее значение перемещений в основании плотины наблюдаем

при наибольшем подпоре плотины со стороны нижнего бьефа. Для исследуемого диапазона изменения аргументов это при 2,8 м, когда имеем, что при напоре в верхнем бьефе 0,5 м перемещение в основании плотины будет 0,045 м, а при напоре в верхнем бьефе 10,0 м перемещение в основании плотины будет 0,063 м. При 1,7 м имеем, что при напоре в верхнем бьефе 0,5 м перемещение в основании плотины будет 0,035 м, а при напоре в верхнем бьефе 10,0 м перемещение в основании плотины будет 0,055 м. При 0,6 м имеем, что при напоре в верхнем бьефе 0,5 м перемещение в основании плотины будет 0,037 м, а при напоре в верхнем бьефе 10,0 м перемещение в основании плотины будет 0,059 м. Таким образом, расположение линий сечений, когда происходит смена порядка их расположения, не учитывающего численное значение аргумента, обязывает нас видеть, что именно в данном диапазоне изменения другого аргумента следует предполагать наличие экстремума.

$$\begin{aligned} &(-1.009500217188346e-4*x^2)-0.00123245242881*x-0.03711395237449698 && \text{---} \text{blue} \\ &(-1.009500217188346e-4*x^2)-0.001055932099515745*x-0.03718456409460862 && \text{---} \text{red} \\ &(-1.009500217188346e-4*x^2)-8.794117702167308e-4*x-0.04431591418204631 && \text{---} \text{green} \end{aligned}$$

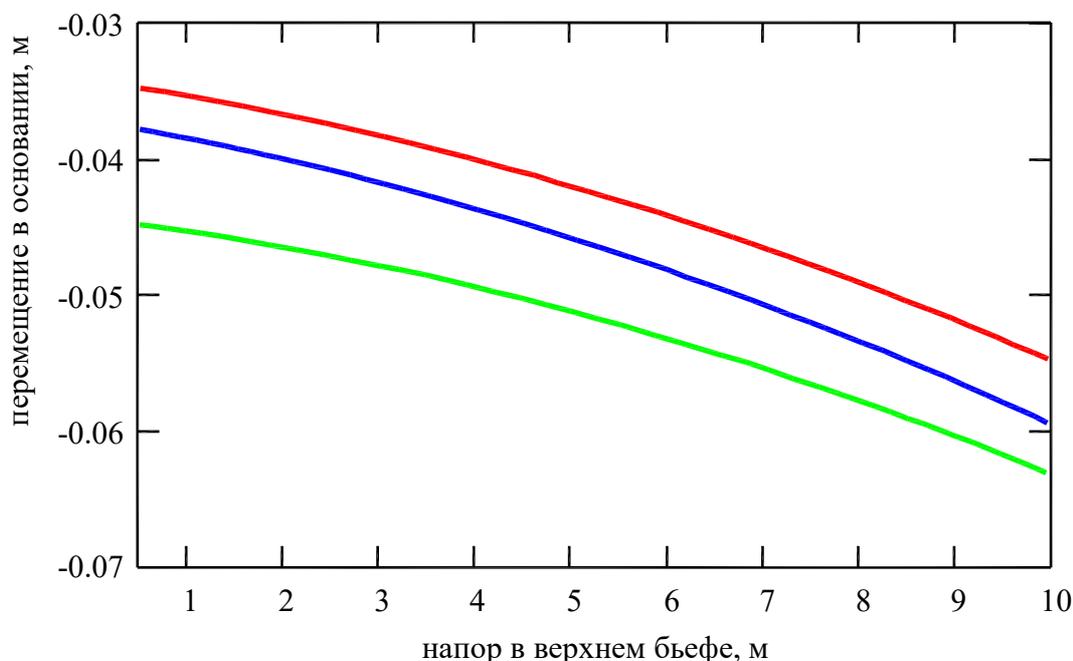


Рисунок 6 – Профили при значениях подпора на плотине 0,6; 1,7 и 2,8 м

Для реализации дальнейших исследований рассмотрим математическую модель при постоянном аргументе напора плотины со стороны верхнего бьефа. Зададим нижеследующие значения этих постоянных величин: 1,0; 5,0 и 10,0 м. Выполнив необходимые расчеты, имеем следующие уравнения:

$$K(1,0, y) = -0,005396999 \cdot x^2 + 0,015236652 \cdot x - 0,04564643,$$

$$K(5,0, y) = -0,005396999 \cdot x^2 + 0,015878544 \cdot x - 0,0533842,$$

$$K(10,0, y) = -0,005396999 \cdot x^2 + 0,01668091 \cdot x - 0,0675991.$$

Воспользовавшись файлом *plot 2d*, реализуем его в нижеследующих границах:

$$\text{plot } 2d([K1(y), K2(y), K3(y), [0,6 \leq x \leq 2,8], [-0,06 \leq y \leq -0,02]]).$$

Результатом данных расчетов будут сечения при выбранных постоянных значениях аргументов, что визуализировано нашло отражение на рисунке 7.

$(-0.005396999325341341 \cdot x^2) + 0.01523665172936452 \cdot x - 0.04564642610552641$ — —
 $(-0.005396999325341341 \cdot x^2) + 0.01587854383590638 \cdot x - 0.05338417160596259$ — —
 $(-0.005396999325341341 \cdot x^2) + 0.01668090896908372 \cdot x - 0.06759910445885538$ — —

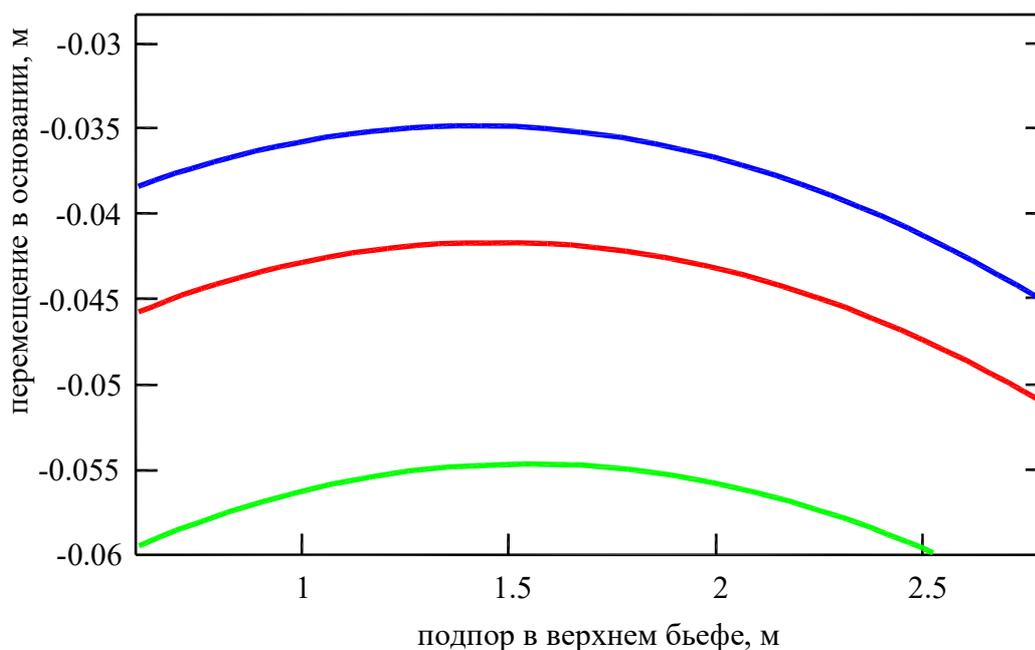


Рисунок 7 – Профили при значениях подпора на плотине 1,0; 5,0 и 10,0 м

Анализ представленных графиков позволяет констатировать, что в диапазоне изменения подпора в верхнем бьефе плотины от 0,6 до 2,8 м перемещения в основании плотины имеют экстремальные значения при выбранных постоянных значениях напора на плотине 1,0; 5,0 и 10,0 м. В целом наибольшие значения перемещений в основании плотины наблюдаем при наибольшем напоре плотины со стороны верхнего бьефа, равном 10,0 м. Далее однозначно прослеживается тенденция: чем меньше напор на плотине, тем меньше перемещения в основании. Для исследуемого диапазона изменения аргументов при напоре в верхнем бьефе 10,0 м имеем экстремум по минимуму при подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 1,53 м, с перемещением в основании плотины, равным минус 0,055 м. В свою очередь при подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 0,6 м, перемещение в основании плотины составляет минус 0,0596 м. При подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 2,53 м, перемещение в основании плотины составляет минус 0,06 м.

Выводы. При напоре в верхнем бьефе, равном 5,0 м, имеем экстремум по минимуму при подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 1,48 м, с перемещением в основании плотины, равным минус 0,047 м. В свою очередь при подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 0,6 м, перемещение в основании плотины составляет минус 0,046 м. При подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 2,8 м, перемещение в основании плотины составляет минус 0,051 м.

При напоре в верхнем бьефе, равном 1,0 м, имеем экстремум по минимуму при подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 1,41 м, с перемещением в основании плотины, равным минус 0,035 м. В свою очередь при подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 0,6 м, перемещение в основании плотины составляет минус 0,038 м. При подпоре со стороны нижнего бьефа, равном 2,8 м, перемещение в основании плотины составляет минус 0,0453 м.

В результате проведенных исследований установлено, что наполнение водохранилища сезонного регулирования даже в пределах нескольких метров значимо влияет на перемещение в основании плотины, при этом чем больше величина этого напора, тем больше осадка в основании. В свою очередь подпор со стороны нижнего бьефа влияет не столь однозначно, что характеризуется образованием экстремумов по минимуму функций.

Список источников

1. Васильев С. М. Водосберегающие технологии орошения и рациональное использование водных ресурсов в АПК России // Современные проблемы развития мелиорации и пути их решения (Костяковские чтения): материалы междунар. науч.-практ. конф. М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, 2020. С. 6–11.
2. Географо-гидрологическая оценка наводнений в Российском Причерноморье / И. А. Вишневецкая, Л. В. Денисов, С. В. Долгов, Н. И. Коронкевич, С. И. Шапоренко, М. Б. Киреева, Н. Л. Фролова, Е. П. Рец, С. Н. Голубчиков // Известия РАН. Серия географическая. Региональные географические проблемы. 2016. № 1. С. 131–146.
3. Development of a decision support system at the stages of pre-design studies and design of irrigation systems based on IDEF0 functional modelling methodology / S. Vasilyev, V. Slabunov, O. Voevodin, A. Slabunova // Irrigation and Drainage. 2020. Vol. 69, № 4. P. 546–558. DOI: 10.1002/ird.2434.
4. Degtyarev G. V., Bakhtamyan N. A. The water structures' operability analysis, taking into account damage and certain negative factors // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 913(2). 022053. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022053.
5. Degtyarev G. V., Abdrazakov F. K., Lavrov N. P. Assessment of the hydraulic structures' technical condition by means of the amplitude-frequency characteristics' analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 913(2). 022056. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022056.
6. Degtyarev G., Takhumova O. Designing an additional freshwater source infrastructure to ensure the environmental sustainability of coastal areas // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference on Sustainable Development of Cross-Border Regions. 2019. 395. 012001. DOI: 10.1088/1755-1315/395/1/012001.
7. Analysis of stress-strain state rainfall runoff control system – buttress dam / O. Degtyareva, G. Degtyarev, I. Togo, V. Terleev, A. Nikonorov, Yu. Volkova // Procedia Engineering. 2019. Vol. 165. P. 1619–1628. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.902>.
8. Degtyarev G. V., Belokur K. A., Sokolova I. V. Modeling of the building by numerical methods at assessment of the technical condition of structures // IOP Conference Series: Materials Science Forum. 2018. 931 MSF. P. 141–147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.141>.
9. Дегтярев Г. В., Дегтярев В. Г., Табаев И. А. Математическое моделирование ослабленных вертикальных несущих конструкций здания при усилении самоупрочиваемым бетоном // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 52. С. 192–198.
10. Numerical modeling of condition of the bridge structure based on the results of national surveys / G. V. Degtyarev, G. S. Molotkov, A. N. Sekisov, D. A. Datsjo // International Journal of Engineering and Technology (UAE): Materials Science Conference. 2018. 7(2.13). P. 226–230. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.13.11866.

11. The foundation pit deep site ground state design modelling / G. V. Degtyarev, D. A. Datsjo, D. A. Vysokovsky, M. S. Turko // IOP Conference Series: Materials Science Forum. 2018. 931 MSF. P. 396–401. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.396>.

12. Дегтярев Г. В., Дацьо Д. А. Особенности расчета плиты покрытия как несущего основания // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2016. № 62. С. 157–165.

13. Дегтярев Г. В., Аль Х. А. Учет нелинейных свойств грунтов основания при использовании современных геотехнических программных комплексов // Институциональные преобразования АПК России в условиях глобальных вызовов: материалы III Междунар. конф. Краснодар: Куб. гос. аграр. ун-т им. И. Т. Трубилина, 2019. С. 42.

14. Дегтярева О. Г., Дегтярев В. Г., Найденов С. Ю. Сейсмостойкость гидротехнических сооружений с учетом работы конструкций за пределом упругости // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации [Электронный ресурс]. 2019. № 1(33). С. 92–108. URL: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=989> (дата обращения: 24.03.2021). DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-92-108.

15. Моделирование и расчет железобетонных конструкций здания в программном комплексе STARK ES: учебник / Г. В. Дегтярев, В. Г. Дегтярев, О. Г. Дегтярева, Н. В. Коженко, Д. А. Дацьо; под общ. ред. Г. В. Дегтярева. Краснодар: КубГАУ, 2018. 188 с.

16. Degtyarev G. V., Dats'о D. A. The seasonal regulation basin dam basis deformation forecast // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 698(2). 022013. DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022013.

17. Khashirova T. Yu., Olgarenko I. V., Kozhenko N. V. The influence analysis of the structures and applied software systems' soil foundations design models // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (CATPID-2020). 2020. Vol. 913. 022050. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022050.

18. Degtyarev V. G., Degtyarev G. V. Possibilities of a dynamic survey method for hydraulic structures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 913(2). 022057. DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022057.

References

1. Vasiliev S.M., 2020. *Vodosberegayushchie tekhnologii orosheniya i ratsional'noe ispol'zovanie vodnykh resursov v APK Rossii* [Water-saving irrigation technologies and rational use of water resources in the agro-industrial complex of Russia]. *Sovremennye problemy razvitiya melioratsii i puti ikh resheniya (Kostyakovskie chteniya): materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Current Problems of Land Reclamation Development and Ways to Solve them (Kostyakov Readings): Proc. of the International Scientific-Practical Conference]. Moscow, All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, pp. 6-11. (In Russian).

2. Vishnevskaya I.A., Denisov L.V., Dolgov S.V., Koronkevich N.I., Shaporenko S.I., Kireeva M.B., Frolova N.L., Retz E.P., Golubchikov S.N., 2016. *Geografo-gidrologicheskaya otsenka navodneniy v Rossiyskom Prichernomor'e* [Geographic and hydrological assessment of floods in the Russian Black Sea region]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. Regional'nye geograficheskie problemy* [Bull. of RAN. Geographic Series. Regional Geographic Problems], no. 1, pp. 131-146. (In Russian).

3. Vasilyev S., Slabunov V., Voevodin O., Slabunova A., 2020. Development of a decision support system at the stages of pre-design studies and design of irrigation systems based on IDEF0 functional modeling methodology. *Irrigation and Drainage*, vol. 69, no. 4, pp. 546-558, DOI: 10.1002 / ird.2434.

4. Degtyarev G.V., Bakhtamyanyan N.A., 2020. The water structures' operability analysis, taking into account damage and certain negative factors. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 913(2), 022053, DOI: 10.1088 / 1757-899X / 913/2/022053.

5. Degtyarev G.V., Abdrazakov F.K., Lavrov N.P., 2020. Assessment of the hydraulic structures' technical condition by means of the amplitude-frequency characteristics' analysis. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 913(2), 022056, DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022056.

6. Degtyarev G., Takhumova O., 2019. Designing an additional freshwater source infrastructure to ensure the environmental sustainability of coastal areas. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Conference on Sustainable Development of Cross-Border Regions, 395, 012001, DOI: 10.1088/1755-1315/395/1/012001.

7. Degtyareva O., Degtyarev G., Togo I., Terleev V., Nikonorov A., Volkova Yu., 2019. Analysis of stress-strain state rainfall runoff control system – buttress dam. Procedia Engineering, vol. 165, pp. 1619-1628, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.11.902>.

8. Degtyarev G.V., Belokur K.A., Sokolova I.V., 2018. Modeling of the building by numerical methods at assessment of the technical condition of structures. IOP Conference Series: Materials Science Forum, 931 MSF, pp. 141-147, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.141>.

9. Degtyarev G.V., Degtyarev V.G., Tabaev I.A., 2015. *Matematicheskoe modelirovanie oslablennykh vertikal'nykh nesushchikh konstruksiy zdaniya pri usilenii samonapryagaemym betonom* [Mathematical modeling of weakened vertical bearing structures of a building in concrete self prestressing amplification]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proc. of Kuban State Agrarian University], no. 52, pp. 192-198. (In Russian).

10. Degtyarev G.V., Molotkov G.S., Sekisov A.N., Dats'o D.A., 2018. Numerical modeling of condition of the bridge structure based on the results of national surveys. International Journal of Engineering and Technology (UAE): Materials Science Conference, 7(2.13), pp. 226-230, DOI: 10.14419/ijet.v7i2.13.11866.

11. Degtyarev G.V., Dats'o D.A., Vysokovsky D.A., Turko M.S., 2018. The foundation pit deep site ground state design modelling. IOP Conference Series: Materials Science Forum, 931 MSF, pp. 396-401, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.396>.

12. Degtyarev G.V., Dats'o D.A., 2016. *Osobennosti rascheta plity pokrytiya kak nesushchego osnovaniya* [Calculation of plate as a supporting base]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proc. of Kuban State Agrarian University], no. 62, pp. 157-165. (In Russian).

13. Degtyarev G.V., Al Kh.A., 2019. *Uchet nelineynykh svoystv gruntov osnovaniya pri ispol'zovanii sovremennykh geotekhnicheskikh programmnykh kompleksov* [Consideration of nonlinear properties of foundation soils when using modern geotechnical software systems]. *Institutsional'nye preobrazovaniya APK Rossii v usloviyakh global'nykh vyzovov: materialy III Mezhdunar. konf.* [Institutional Transformations of the Russian Agro-Industrial Complex in the Context of Global Challenges: Proc. of the III International Conference]. Krasnodar, Cuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, p. 42. (In Russian).

14. Degtyareva O.G., Degtyarev V.G., Naydenov S.Yu., 2019. [Seismic resistance of hydraulic structures taking into account the work of structures beyond the elastic limit]. *Nauchnyy Zhurnal Rossiyskogo NII Problem Melioratsii*, no. 1(33), pp. 92-108, available: <http://www.rosniipm-sm.ru/article?n=989> [accessed 24.03.2021], DOI: 10.31774/2222-1816-2019-1-92-108. (In Russian).

15. Degtyarev G.V., Degtyarev V.G., Degtyareva O.G., Kozhenko N.V., Dats'o D.A., 2018. *Modelirovanie i raschet zhelezobetonnykh konstruksiy zdaniya v programnom komplekse STARK ES: uchebnyy* [Modeling and calculation of reinforced concrete structures of a building in the STARK ES software package: textbook]. Krasnodar, KubGAU, 188 p. (In Russian).

16. Degtyarev G.V., Dats'o D.A., 2020. The seasonal regulation basin dam basis deformation forecast. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 698(2), 022013, DOI: 10.1088/1757-899X/698/2/022013.

17. Khashirova T.Yu., Olgarenko I.V., Kozhenko N.V., 2020. The influence analysis

of the structures and applied software systems' soil foundations design models. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (CATPID-2020), vol. 913, 022050, DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022050.

18. Degtyarev V.G., Degtyarev G.V., 2020. Possibilities of a dynamic survey method for hydraulic structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 913(2), 022057, DOI: 10.1088/1757-899X/913/2/022057.

Информация об авторах

О. Г. Дегтярева – доцент, кандидат технических наук, доцент;

С. М. Васильев – главный научный сотрудник, доктор технических наук, профессор.

Information about the authors

O. G. Degtyareva – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

S. M. Vasilyev – Chief Researcher, Doctor of Technical Sciences, Professor.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.03.2021; одобрена после рецензирования 20.04.2021; принята к публикации 23.04.2021.

The article was submitted 09.03.2021; approved after reviewing 20.04.2021; accepted for publication 23.04.2021.